

PENGARUH DEKOMPOSISI ETTRINGITE DAN PORTLANDITE TERHADAP KEKUATAN MEKANIK MORTAR

Indra Perdana¹ dan Sri Fatimah²

ABSTRACT

Mortar, widely used in building construction, is a cement-based substance, which is prepared from portland cement and fine aggregate with a certain composition. In this research, the effect of high temperature on compressive strength of mortar was investigated. Ratio of portland cement to sand was varied from 1 : 3 to 1 : 6. After casting, samples were submerged in water for 28 days and then dried in ambient condition.

The samples were exposed to high temperature in an electrical furnace. The temperature was in the range of 200°C to 500°C. For each temperature, in a certain period of time, weight and compressive strength of the samples were determined. A mathematics model was proposed to approach the kinetic of decomposition.

The data showed that compressive strength of the samples decreased along heating process. The compressive strength decreased significantly at temperature range of 200°C to 500°C. At 400°C, the compressive strength decreased to about 20% of its initial strength. Meanwhile, at 500°C the samples lost all of their compressive strength. The result also showed that the ratio of portland cement to sand did not have significant contribution to the rate of decreasing of compressive strength of the samples and the rate of decomposition itself. Based on the data, decreasing of compressive strength of the samples was more influenced by the decomposition of portlandite than by the decomposition of ettringite. The proposed mathematics model could be used to approach the kinetic of decomposition. The results also showed that the decomposition process was controlled by diffusion of vapor.

PENGANTAR

Semen merupakan media perekat serta pe-nguat utama bahan bangunan baik sebagai plaster, mortar maupun beton. Pada peristiwa bangunan se-men yang terbakar, diketahui kekuatan daya du-kung bangunan itu akan menurun. Pengurangan ke-kuatan bangunan pasca terbakar disebabkan karena terjadinya peruraian mineral-mineral yang semula berfungsi sebagai bahan pengikat. Pada awal peris- tiwa pembakaran saat suhu belum terlalu tinggi peruraian yang dominan terjadi adalah dehidrasi mineral *ettringite* dan *portlandite*.

Pada penelitian terdahulu dipelajari dehi-drasi semen terhidrat secara keseluruhan dan pe-ngaruhnya terhadap kekuatan mekanik bahan plas-ter (Perdana, 2001). Pada penelitian ini dipelajari perbandingan semen *Original Portland Cement* (OPC) – pasir, suhu, dan waktu terhadap kecepatan dekomposisi mineral *ettringite* dan *portlandite* yang terdapat dalam mortar akibat pembakaran. Penelitian sejenis yang ada masih bertitik berat pada informasi penurunan kekuatan mekanik bahan akibat pembakaran. Penelitian yang mempelajari kecepatan atau kinetika penurunan kekuatan meka-nik mortar akibat pengaruh suhu tinggi belum per-nah dilakukan. Dalam penelitian ini dilakukan pe-ngamatan yang terkait dengan kecepatan pengura-ngan kekuatan mekanik mortar akibat pembakaran.

Melalui penelitian ini diharapkan akan dipe-roleh informasi kuantitatif tentang pengurangan ke-kuatan mekanik (kuat desak) mortar akibat pemba-karan. Selain itu juga diperolehnya tetapan-tetapan kinetika peruraian mineral *ettringite* dan *portlandite* dalam mortar dan penurunan kekuatan mekanik ortar akibat pembakaran.

TINJAUAN PUSTAKA

Semen portland adalah suatu semen hidraulik yang merupakan komponen perekat utama pada bangunan. Jenis semen portland ditentukan oleh jenis dan komposisi senyawa kimia yang dikandungnya (US Department of Transportation, 2001). Kompo-sisi kimia semen ditentukan oleh kandungan oksid silika (SiO_2), lime (CaO), alumina (Al_2O_3), dan besi (Fe_2O_3). Oksid-oksida ini setelah mengalami kalsi-nasi berubah menjadi mineral-mineral silikat yang setelah melalui penambahan gipsium dan pengge-rusan membentuk semen. Mineral-mineral utama penyusun semen adalah senyawa silikat berupa $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S / *allite*) dan $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S / *belite*), aluminat berupa $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A), dan aluminat ferat berupa $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF). Selain itu juga terdapat *lime* bebas, magnesia, al-kali dan beberapa unsur lain seperti titanium dan mangan dalam jumlah kecil. Pada umumnya semen portland tersusun atas komposisi

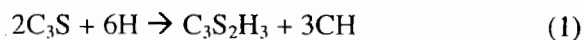
¹ Indra Perdana, ST, MT, ² Ir. Sri Fatimah, Dosen Jurusan Teknik Kimia, FT-UGM

oksid lime (CaO) 60-67%, silika (SiO₂) 17-25%, alumina (Al₂O₃) 2-8%, besi (Fe₂O₃) 0-6% dan juga sulfur trioksid (SO₃) dari gipsum 1-7%, mangan (MgO) 0,1-5% dan oksid dari alkali lainnya 0,1-1,5% (Global Net-work of Construction, 2001). Berdasarkan kom-posisinya terdapat lima jenis semen portland yaitu tipe I (*ordinary*), tipe II (*modified*), tipe III (*high strength*) tipe IV (*low heat*) dan tipe V (*sufrafe re-sisting*). Mengacu pada standar ASTM, semen portland tipe I (OPC) yang digunakan untuk keperluan umum memiliki komposisi mineral C₃S 46%, C₂S 28%, C₃A 10%, dan C₃AF 10% (Duda, 1985).

Proses pengerasan semen menjadi semen terhidrat (hidrasi) merupakan reaksi kimia antara mineral-mineral penyusun semen portland dengan air. Reaksi hidrasi yang terjadi sesungguhnya sangat kompleks. Berdasarkan mineral penyusun semen portland, reaksi hidrasi yang terjadi adalah sebagai berikut (Janotka, 2000)

a) Hidrasi trikalsium silikat (C₃S) atau *allite*

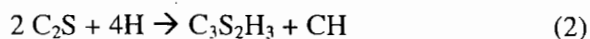
Reaksi ini berlangsung cepat dan mengikut persamaan



Hidrasi C₃S memberikan kontribusi utama pada pembentukan kekuatan awal.

b) Hidrasi dikalsium silikat (C₂S) atau *belite*

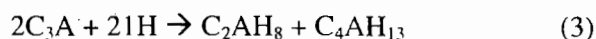
Reaksi ini berlangsung lambat dan mengikut persamaan



Hidrasi C₂S memberikan kontribusi kekuatan pada waktu yang lama.

c) Hidrasi trikalsium aluminat (C₃A)

Hidrasi C₃A sangat besar kontribusinya terhadap pembentukan kekuatan awal. Reaksi yang terjadi mengikuti persamaan

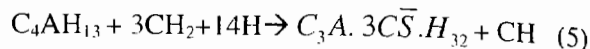


C₂AH₈ dan C₄AH₁₃ bersifat tidak stabil dan segera mengalami reaksi lanjut ke bentuk yang lebih stabil



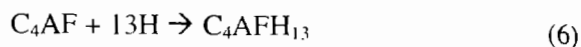
Reaksi pembentukan C₃AH₆ terjadi sangat cepat. Bila di dalam campuran terdapat cukup banyak lime bebas maka reaksi akan lebih cenderung membentuk C₄AH₁₃ dan sekaligus memperlambat pembentukan C₃AH₆. Untuk memperlambat reaksi ke dalam campuran ditambahkan gipsum yang kemudian

membentuk mineral *ettringite* (C₃A.3C₃S̄.H₃₂). Reaksi pembentukan *ettringite* adalah



d) Hidrasi trikalsium alumina ferat (C₃AF)

Reaksi yang terjadi lebih lambat dibanding hidrasi C₃A tetapi meningkat seiring dengan naiknya rasio A/F.



Secara keseluruhan hidrasi C₃A dan C₃AF memiliki kontribusi yang kecil terhadap kekuatan akhir semen portland terhidrat yang diperoleh.

Dalam bangunan, semen portland digunakan dalam bentuk campurannya dengan *agregate* dengan komposisi tertentu. *Agregate* yang dipakai dapat berupa *agregate* halus pada mortar, atau *agregate* halus dan kasar pada beton. Pada umumnya *agregate* ini bersifat inert, berbentuk butiran, merupakan senyawa anorganik berupa batuan atau bahan padat lain yang bersifat seperti batu. Umumnya digunakan pasir atau batuan yang dihancurkan. Pada saat terjadi proses pengerasan akibat hidrasi, semen terhidrat akan mengisi ruang-ruang antar *agregate* dan sekaligus mengikatnya dalam suatu matrik yang masif. Pada beton *agregate* dapat menempati sekitar ¾ dari volum yang ada. Kekuatan mortar atau beton sangat dipengaruhi komposisi semen-*agregate* yang digunakan (Popovics, 2002).

Menurut Balazs, dkk. (1997), pada suhu tinggi semen terhidrat akan mengalami peruraian. Pada suhu sekitar 100°C akan terjadi pelepasan air bebas dalam semen terhidrat. Pada suhu yang lebih tinggi akan terjadi dehidrasi, berupa pelepasan air kristal (hidrat). *Ettringite* (C₃A.3C₃S̄.H₃₂) mulai tidak stabil dan terdekomposisi pada kisaran suhu sekitar 60°C – 70°C (G.M. Indorn Consult, 2000). Sementara mineral *portlandite* (Ca(OH)₂) mengalami peruraian pada kisaran suhu 240°C – 550°C. (Marra, dkk., 2001). Dehidrasi mineral *tobermorite* terjadi pada kisaran suhu 560°C – 800°C. Dehidrasi C₃AH₆ terjadi pada kisaran suhu 900°C – 1000°C. Selain itu juga terjadi dekomposisi senyawa CaCO₃ pada suhu sekitar 900°C. Menurut Sumardi (1999) peristiwa dehidrasi tersebut dapat dituliskan dalam persamaan-persamaan reaksi sebagai berikut

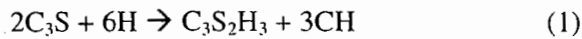


oksid lime (CaO) 60-67%, silika (SiO₂) 17-25%, alumina (Al₂O₃) 2-8%, besi (Fe₂O₃) 0-6% dan juga sulfur trioksida (SO₃) dari gipsum 1-7%, mangan (MgO) 0,1-5% dan oksid dari alkali lainnya 0,1-1,5% (Global Net-work of Construction, 2001). Berdasarkan komposisinya terdapat lima jenis semen portland yaitu tipe I (*ordinary*), tipe II (*modified*), tipe III (*high strength*) tipe IV (*low heat*) dan tipe V (*sulflae re-sisting*). Mengacu pada standar ASTM, semen portland tipe I (OPC) yang digunakan untuk keperluan umum memiliki komposisi mineral C₃S 46%, C₂S 28%, C₃A 10%, dan C₃AF 10% (Duda, 1985)

Proses pengerasan semen menjadi semen terhidrat (hidrasi) merupakan reaksi kimia antara mineral-mineral penyusun semen portland dengan air. Reaksi hidrasi yang terjadi sesungguhnya sangat kompleks. Berdasarkan mineral penyusun semen portland, reaksi hidrasi yang terjadi adalah sebagai berikut (Janotka, 2000)

a) Hidrasi trikalsium silikat (C₃S) atau *allite*

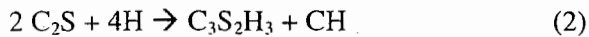
Reaksi ini berlangsung cepat dan mengikut persamaan



Hidrasi C₃S memberikan kontribusi utama pada pembentukan kekuatan awal.

b) Hidrasi dikalsium silikat (C₂S) atau *belite*

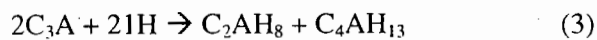
Reaksi ini berlangsung lambat dan mengikut persamaan



Hidrasi C₂S memberikan kontribusi kekuatan pada waktu yang lama.

c) Hidrasi trikalsium aluminat (C₃A)

Hidrasi C₃A sangat besar kontribusinya terhadap pembentukan kekuatan awal. Reaksi yang terjadi mengikuti persamaan

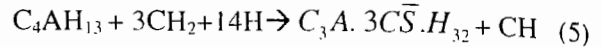


C₂AH₈ dan C₄AH₁₃ bersifat tidak stabil dan segera mengalami reaksi lanjut ke bentuk yang lebih stabil



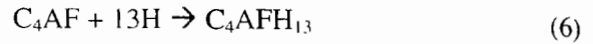
Reaksi pembentukan C₃AH₆ terjadi sangat cepat. Bila di dalam campuran terdapat cukup banyak lime bebas maka reaksi akan lebih cenderung membentuk C₄AH₁₃ dan sekaligus memperlambat pembentukan C₃AH₆. Untuk memperlambat reaksi ke dalam campuran ditambahkan gipsum yang kemudian

membentuk mineral *ettringite* (C₃A. 3C₃S̄.H₃₂). Reaksi pembentukan *ettringite* adalah



d) Hidrasi trikalsium alumina ferat (C₃AF)

Reaksi yang terjadi lebih lambat dibanding hidrasi C₃A tetapi meningkat seiring dengan naiknya rasio A/F.



Secara keseluruhan hidrasi C₃A dan C₃AF memiliki kontribusi yang kecil terhadap kekuatan akhir semen portland terhidrat yang diperoleh.

Dalam bangunan, semen portland digunakan dalam bentuk campurannya dengan *agregate* dengan komposisi tertentu. *Agregate* yang dipakai dapat berupa *agregate* halus pada mortar, atau *agregate* halus dan kasar pada beton. Pada umumnya *agregate* ini bersifat inert, berbentuk butiran, merupakan senyawa anorganik berupa batuan atau bahan padat lain yang bersifat seperti batu. Umumnya digunakan pasir atau batuan yang dihancurkan. Pada saat terjadi proses pengerasan akibat hidrasi, semen terhidrat akan mengisi ruang-ruang antar *agregate* dan sekaligus mengikatnya dalam suatu matrik yang masif. Pada beton *agregate* dapat menempati sekitar ¾ dari volume yang ada. Kekuatan mortar atau beton sangat dipengaruhi komposisi semen-*agregate* yang digunakan (Popovics, 2002).

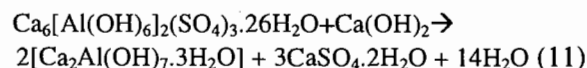
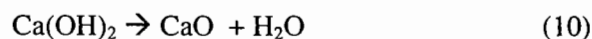
Menurut Balazs, dkk. (1997), pada suhu tinggi semen terhidrat akan mengalami peruraian. Pada suhu sekitar 100°C akan terjadi pelepasan air bebas dalam semen terhidrat. Pada suhu yang lebih tinggi akan terjadi dehidrasi, berupa pelepasan air kristal (hidrat). *Ettringite* (C₃A. 3C₃S̄.H₃₂) mulai tidak stabil dan terdekomposisi pada kisaran suhu sekitar 60°C – 70°C (G.M. Indorn Consult, 2000). Sementara mineral *portlandite* (Ca(OH)₂) mengalami peruraian pada kisaran suhu 240°C – 550°C. (Marra, dkk., 2001). Dehidrasi mineral *tobermorite* terjadi pada kisaran suhu 560°C – 800°C. Dehidrasi C₃AH₆ terjadi pada kisaran suhu 900°C – 1000°C. Selain itu juga terjadi dekomposisi senyawa CaCO₃ pada suhu sekitar 900°C. Menurut Sumardi (1999) peristiwa dehidrasi tersebut dapat dituliskan dalam persamaan-persamaan reaksi sebagai berikut



Peristiwa dehidrasi mengakibatkan turunnya kekuatan mekanik semen terhidrat, plaster, mortar, atau beton. Semen portland terhidrat akan kehilangan kekuatan mekaniknya dan mulai terdisintegrasi pada suhu 500°C. Kekuatan mekanik beton yang menggunakan semen portland akan minimum pada kisaran suhu 900°C – 1000°C. Di atas suhu ini akan terjadi reaksi antara senyawa hasil dehidrasi dan agregat-agregat yang ada (pada mortar atau beton) membentuk suatu ikatan keramik yang menaikkan kekuatan mekanik bahan. Bahkan kekuatan beton yang telah terbakar di atas suhu tersebut dapat memiliki kekuatan mekanik yang lebih besar daripada beton semula (Taylor, 1964). Hasil penelitian Castillo dan Durrani (1990) menyebutkan bahwa beton dari semen portland akan kehilangan 15% sampai 20% kekuatannya pada suhu pembakaran 100°C sampai 300°C. Pada suhu 300°C sampai 400°C beton mengalami kenaikan kekuatan sampai 8% lebih kuat dibanding kekuatan semula. Pada suhu yang lebih tinggi kekuatan beton akan turun secara tajam dan mencapai mencapai 30% kekuatan semula pada suhu 800°C. Penelitian tentang dehidrasi semen terhidrat (Perdana, 2001) menunjukkan bahwa kekuatan mekanik semen terhidrat mencapai minimum pada suhu 500°C. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa pada kisaran suhu percobaan (300°C s.d. 500°C) kecepatan dehidrasi dikontrol oleh kecepatan transfer massa uap air melalui lapisan *anhydrate* dan reaksi yang terjadi merupakan reaksi searah.

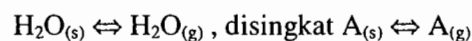
LANDASAN TEORI

Penurunan kekuatan mekanik bahan ber-basis semen portland akibat suhu tinggi tidak lepas dari peristiwa peruraian mineral-mineral terhidrat yang ada. Karena semen portland merupakan komponen pengikat utama dalam plaster, mortar, mau-pun beton, maka, seperti apa yang terjadi pada semen terhidrat (Perdana, 2001), pembakaran suhu tinggi akan mengakibatkan penurunan kekuatan mekanik pada bahan tersebut. Besar penurunan yang terjadi dipengaruhi oleh komposisi yang digunakan. Pada penelitian ini dipelajari pengaruh peruraian mineral *ettringite* dan *portlandite* terhadap kekuatan mekanik bahan. Karena mineral *portlandite* sudah terdisintegrasi sempurna pada suhu sekitar 500°C, maka pengamatan pada penelitian ini dilakukan pada kisaran suhu di bawah 500°C. Pada pemanasan sampai 500°C peristiwa yang mungkin terjadi adalah pelepasan air bebas (air pori), dekomposisi mineral *ettringite* ($C_3A \cdot 3\bar{C}\bar{S} \cdot H_{32}$), dan dekomposisi mineral *portlandite* ($Ca(OH)_2$).



Peruraian mineral *ettringite* dan *portlandite* ini, pada prinsipnya sama dengan jenis reaksi padat yang lain. Reaksi yang terjadi meliputi mekanisme transfer massa melalui lapisan unhidrat dan reaksi permukaan yang berlangsung secara seri. Dalam hal ini kecepatan reaksi keseluruhan ditentukan oleh tahapan yang paling lambat.

Pada penelitian ini juga diajukan suatu model matematis dengan anggapan padatan ber-bentuk silinder, tahanan transfer panas dalam padatan diabaikan, reaksi terjadi pada seluruh bagian padatan, dan transfer massa uap air dalam padatan berlangsung secara difusi. Karena jumlahnya yang sedikit, pada penelitian ini uap air yang terbentuk akibat dekomposisi *ettringite* dan *portlandite* dianggap berasal dari suatu air kristal yang sama.



Dari neraca massa H_2O fasa padat dan uap dalam sampel bentuk silinder diperoleh persamaan diferensial berikut,

$$-\frac{\partial C_{As}}{\partial t} = k_1 C_{As} - k_2 C_{Ag} \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 C_{Ag}}{\partial r^2} + \frac{\partial C_{Ag}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{Ag}}{\partial z^2} + \frac{k_1}{D_e} C_{Ag} - \frac{k_2}{D_e} C_{As} = \frac{1}{D_e} \frac{\partial C_{Ag}}{\partial t} \quad (13)$$

dengan kondisi batas penyelesaian:

$$t = 0; C_{As}(z, 0) = C_{A0}; C_{Ag}(z, 0) = 0 \quad (14)$$

$$t = t; r = 0; \left. \frac{\partial C_{Ag}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (15)$$

$$r = R; \left. \frac{\partial C_{Ag}}{\partial r} \right|_{r=R} = -\frac{kg}{D_e} (C_{Ag} - C_{Aout}) \quad (16)$$

$$z = 0; \left. \frac{\partial C_{Ag}}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (17)$$

$$z = L/2; \left. \frac{\partial C_{Ag}}{\partial z} \right|_{z=L/2} = -\frac{kg}{D_e} (C_{Ag} - C_{Aout}) \quad (18)$$

Berat A setiap saat adalah

$$W_A = 4\pi \cdot M_A \cdot \int_{z=0}^{z=L/2} \int_{r=0}^{r=R} r \cdot C_{As}(z, r) dr dz \quad (19)$$

Pengurangan berat bahan setiap saat

$$X = \frac{\Delta W}{W_0} = \frac{W_0 - (W_{A0} - W_A)}{W_0} \cdot 100\% \quad (20)$$

Hubungan antara penurunan kuat desak bahan dan tingkat dehidrasi bahan yang terjadi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut

$$\frac{f(t)}{f_0} = F(X) \quad (21)$$

Berdasarkan persamaan 12 sampai dengan 20, bila nilai pengurangan berat bahan setiap saat (X) diketahui maka nilai tetapan k_1 , k_2 dan D_e dapat dievaluasi. Nilai tetapan k_1 , k_2 dan D_e ditentukan sedemikian sehingga memberikan jumlah kuadrat kesalahan (*sum of square of errors*) terkecil antara persen pengurangan berat data percobaan dan hasil hitungan.

CARA PENELITIAN

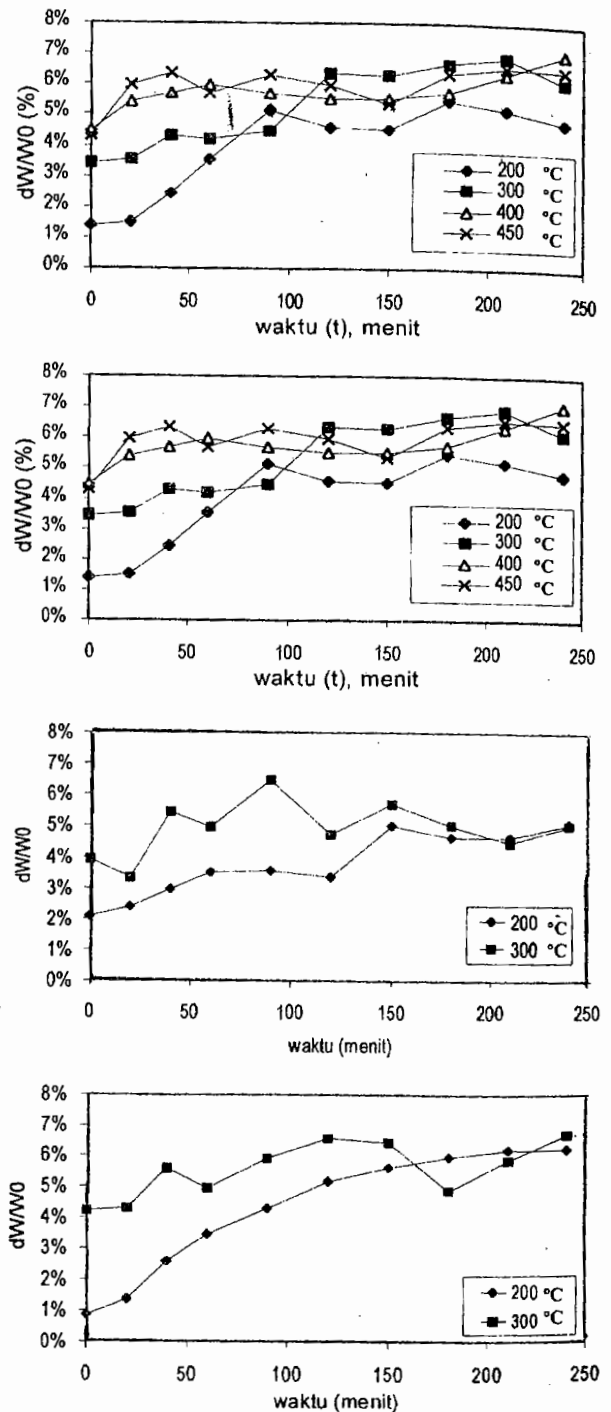
Pasir hasil pengayakan yang lolos ayakan 10 mesh dicampur dengan OPC dengan perbandingan semen – pasir 1:3, 1:4, 1:5, dan 1:6. Campuran padat yang diperoleh setelah diberi air secukupnya dan dicetak dengan ukuran panjang 5 cm dan diameter 2,5 cm, dibiarkan mengeras di udara terbuka selama satu hari. Setelah cukup keras sampel direndam dalam air selama 28 hari. Setelah itu sampel dikeringkan dan dibakar pada suhu 200°C, 300°C, 400°C, 450°C, dan 500°C. Untuk masing-masing suhu setiap selang waktu tertentu sampel ditentukan pengurangan beratnya. Selain pengurangan berat, ditentukan juga kuat desak bahan hasil pembakaran yang dilakukan 3 hari setelah pembakaran. Analisis mineralogi dilakukan dengan metode difraksi sinar X.

Data penurunan berat dan kuat desak digunakan untuk mengevaluasi model matematis yang diajukan. Dalam evaluasi model matematis, dilakukan optimasi tetapan k_1 , k_2 , dan D_e dengan meminimasi jumlah kuadrat kesalahan antara pengurangan berat data percobaan dan hasil perhitungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada gambar 1 terlihat bahwa semakin lama waktu pembakaran maka semakin besar pengurangan berat sampel yang terjadi. Pengurangan berat ini disebabkan adanya uap yang hilang akibat adanya dekomposisi senyawa-senyawa terhidrat yang terbentuk saat proses hidrasi semen portland. Pada penelitian ini pengamatan dilakukan pada kisaran suhu di bawah 500°C. Bahan dalam mortar yang mungkin terdekomposisi pada kisaran suhu ini adalah mineral *ettringite* dan *portlandite*. Dekomposisi yang

terjadi tidak lain adalah reaksi dehidrasi senyawa-senyawa terhidrat.



Gambar 1. Data persen pengurangan berat sampel hasil pembakaran

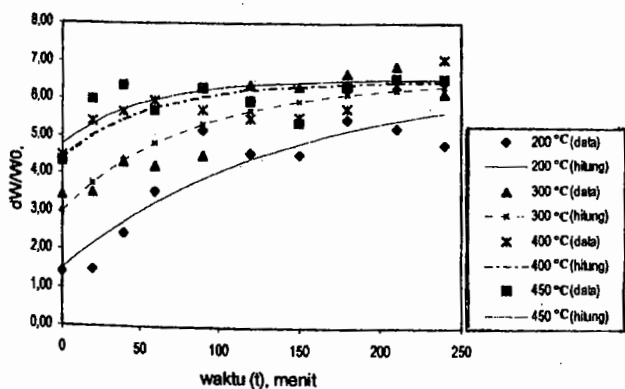
Gambar 1 juga menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu maka semakin cepat dan semakin besar pula pengurangan berat yang terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu maka semakin cepat proses dehidrasi yang terjadi. Bahkan pada suhu 450°C terlihat bahwa kenaikan persen

pengurangan berat bahan sepanjang waktu pengamatan sudah tidak berarti lagi yang dikarenakan sudah banyaknya air kristal yang terdekomposisi selama proses kenaikan suhu.

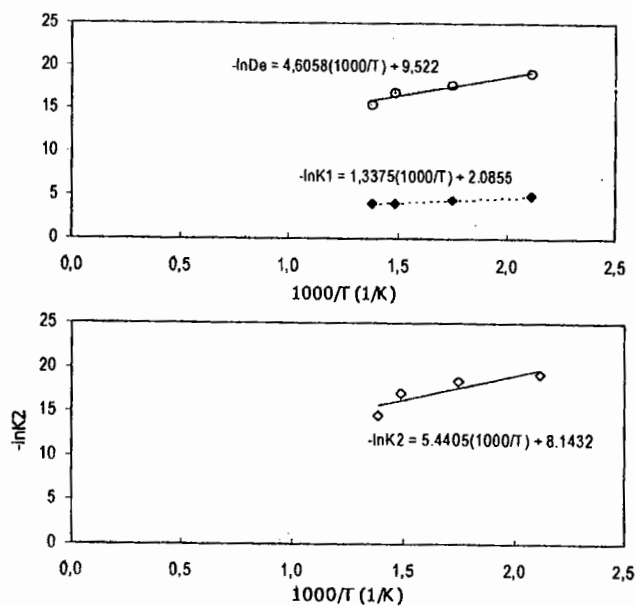
Terlihat pada gambar 1 bahwa perbedaan perbandingan semen-pasir tidak memberikan pengaruh yang cukup berarti terhadap kecepatan dan besarnya pengurangan berat bahan. Dengan kata lain kecepatan dehidrasi air kristal yang ada tidak dipengaruhi oleh perbandingan semen OPC-pasir dalam mortar, tetapi hanya dipengaruhi oleh suhu. Berdasarkan hal ini, maka kecepatan dehidrasi untuk suatu komposisi dapat digunakan untuk memperkirakan kecepatan dehidrasi komposisi yang lain pada suhu yang sama. Pengamatan kinetika dehidrasi dapat dilakukan berdasarkan data penelaitan dari salah satu komposisi (perbandingan OPC-pasir) mortar yang digunakan.

Verifikasi model matematis yang diajukan dilakukan dengan membandingkan persen pengurangan berat bahan antara data penelitian dan hasil perhitungan. Gambar 2 menunjukkan bahwa hasil perhitungan berdasarkan model matematis yang diajukan cukup dekat dengan data penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa model matematis yang diajukan dapat digunakan untuk mendekati peristiwa dehidrasi yang terjadi.

Seperti halnya reaksi dekomposisi padatan pada umumnya yang menghasilkan produk berupa uap, maka kecepatan reaksi keseluruhan lebih di-kontrol oleh kecepatan transfer massa difusi uap hasil dekomposisi melalui lapisan produk. Pada peristiwa dehidrasi senyawa terhidrat, maka kecepatan reaksi keseluruhan dikontrol oleh kecepatan difusi uap air melalui lapisan hasil dehidrasi. Hal ini juga ditunjukkan dari hasil perhitungan berdasarkan model matematis yang diajukan.



Gambar 2. Pengurangan berat data percobaan dan hasil hitungan (komposisi 1:3)



Gambar 3. Hubungan k_1 , k_2 , dan D_e terhadap suhu

Seperti terlihat pada gambar 3, hasil per-hitungan menunjukkan bahwa nilai tetapan reaksi k_1 jauh lebih besar dari daripada nilai difusivitas uap air D_e melalui lapisan hasil dehidrasi. Karena reaksi pembentukan uap air dan difusi merupakan suatu proses seri, maka secara keseluruhan dehidrasi mortar dikontrol oleh difusi massa uap air melalui lapisan produk dehidrasi. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pada kisaran suhu percobaan reaksi dehidrasi yang terjadi lebih cenderung berlangsung ke kanan. Hal ini ditandai dengan nilai tetapan reaksi ke kanan k_1 yang jauh lebih besar dibandingkan dengan nilai tetapan reaksi ke kiri k_2 . Dengan kata lain, pada kisaran suhu percobaan, reaksi berlangsung secara satu arah. Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai tetapan reaksi k_1 , dan k_2 , serta nilai difusivitas uap air D_e semakin besar dengan naiknya suhu. Dengan menganggap perubahan nilai ketiga tetapan di atas terhadap suhu mengikuti persamaan Arrhenius, maka nilai ketiga tetapan di atas dapat dinyatakan dalam persamaan berikut

$$\ln k_1 = -1337,5/T - 2,0855 \quad (22)$$

$$\ln k_2 = -5440,5/T - 8,1432 \quad (23)$$

$$\ln D_e = -4605,8/T - 9,522 \quad (24)$$

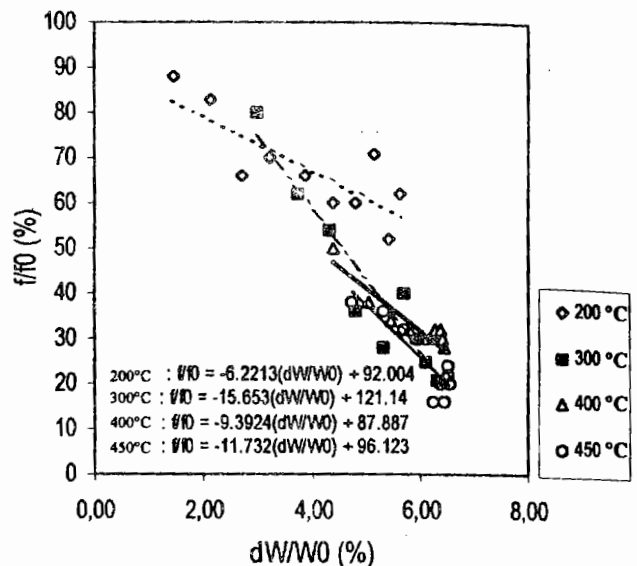
dengan ralat rerata masing-masing sebesar 0,58%, 4,96%, dan 5,23%. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa energi aktivasi reaksi ke kanan sekitar 4 kali lebih kecil dibandingkan dengan energi aktivasi reaksi ke kiri dan 3,5 kali lebih kecil daripada energi aktivasi difusi massa. Hal ini menyebabkan untuk tiap kenaikan suhu akan mengakibatkan kenaikan kecepatan reaksi ke kanan akan lebih besar daripada

kenaikan kecepatan reaksi ke kiri dan kenaikan kecepatan difusi massa uap air. Meskipun nilai tetapan reaksi pembentukan uap air (reaksi ke kanan) dan kecepatan kenaikannya terhadap suhu jauh lebih besar dibandingkan dengan reaksi ke kiri tetapi hal ini tidak diimbangi dengan kenaikan kecepatan difusi massa uap air terhadap kenaikan suhu. Sebagai akibat dari fenomena ini, seperti terlihat pada gambar 7, kenaikan persen pengurangan berat bahan yang cukup tinggi hanya terjadi pada saat awal reaksi saja. Selanjutnya reaksi lebih dikontrol oleh kecepatan difusi massa uap air. Bila dipandang reaksi mengikuti *shrinkage core model*, pada saat awal reaksi lapisan produk *anhydrate* belum terbentuk sehingga reaksi dapat berlangsung cepat. Seiring dengan jalannya waktu, maka lapisan produk *anhydrate* semakin tebal sehingga difusi massa uap air melalui lapisan itu semakin mengontrol.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kuat desak mortar semakin rendah dengan naiknya suhu. Pada suhu 450°C, kuat desak mortar dapat turun menjadi sekitar 20% dari kekuatan semula. Bahkan berdasarkan hasil pengamatan pada suhu 500°C mortar telah kehilangan seluruh kuat desak-nya. Selain disebabkan faktor-faktor fisis dan mekanis, penurunan kuat desak mortar ini tidak dapat dipisahkan dari adanya peristiwa dekomposisi mineral terhidrat yang terdapat di dalam mortar selama pembakaran. Semakin tinggi tingkat dehidrasi yang terjadi, semakin rendah kuat desak mortar hasil pembakaran. Mortar tersusun atas pasir (mineral-mineral *feldspar*) sebagai agregat halus dan semen portland terhidrat sebagai perekat. Pada pembakaran di bawah 500°C, mineral yang mungkin mengalami dekomposisi adalah mineral *ettringite* dan *portlandite*. Mineral-mineral ini akan terurai menghasilkan CaO dan melepaskan uap air yang semula terikat sebagai air kristal. CaO hasil peruraian bersifat higroskopis dan akan bereaksi dengan uap air di udara membentuk mineral *portlandite* kembali. Reaksi ini berlangsung cukup lambat. Bersamaan dengan pembentukan mineral *portlandite* akan terjadi ekspansi volum. Meskipun jumlahnya tidak sebanyak mineral lainnya pembentukan kembali *portlandite* yang disertai dengan ekspansi volum ini akan menyebabkan timbulnya tekanan yang mengakibatkan retak pada mortar hasil pembakaran. Karena adanya fenomena ini, maka penentuan kuat desak mortar dilakukan setelah beberapa hari setelah masa pembakaran untuk memberikan kesempatan pada CaO hasil pembakaran bereaksi dengan uap air dalam udara.

Seperti halnya pada penurunan berat mortar, maka penurunan kuat desak mortar akibat pembakaran relatif tidak dipengaruhi oleh komposisi (perbandingan semen-pasir) mortar. Kuat desak akhir

mortar hasil pembakaran hanya ditentukan oleh kuat desak awal mortar. Oleh karenanya, pengamatan terhadap kecepatan penurunan kuat desak mortar dapat dilakukan pada salah satu komposisi saja.



Gambar 4. Hubungan kuat desak dan penurunan berat bahan (komposisi 1:3)

Pada gambar 4 terlihat bahwa penurunan kuat desak mortar hasil pembakaran berbanding lurus dengan penurunan berat mortar. Terlihat jelas bahwa penurunan kuat desak mortar sangat dipengaruhi oleh suhu. Untuk penurunan berat yang sama, kuat desak mortar akan lebih rendah jika dibakar pada suhu yang lebih tinggi. Pada kisaran suhu percobaan, pada suhu 300°C mortar akan mengalami penurunan kuat desak yang lebih besar untuk setiap penurunan berat bahan.

Hasil analisis mineralogi menunjukkan bahwa komposisi mineral mortar pasca pembakaran didominasi oleh golongan *feldspar* yang berasal dari pasir. Mineral *feldspar* yang terkandung dalam mortar terdiri atas mineral *albite* ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), *orthoclase* (KAlSi_3O_8), *lissetite* ($\text{Na}_2\text{CaAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$), dan *paracelsian* ($\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Pada dasarnya, pada kisaran suhu percobaan, mineral-mineral *feldspar* ini bersifat inert. Pada hasil analisis mineralogi tidak terlihat keberadaan mineral *ettringite* $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})$. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan mineral *ettringite* di dalam mortar sangatlah kecil, sehingga pengaruhnya terhadap perubahan kekuatan mekanik bahan akibat pembakaran juga sangat kecil. Sedangkan pengurangan jumlah mineral *portlandite* $\text{Ca}(\text{OH})_2$ selama proses pembakaran sangat berarti meskipun mineral *portlandite* yang teridentifikasi adalah gabungan mineral *portlandite* yang belum terdehidrasi dan mineral *portlandite* hasil hidrasi ulang antara CaO hasil pembakaran dan uap air dalam udara.

KESIMPULAN

Kecepatan dekomposisi dan penurunan kekuatan mortar pada kisaran suhu penelitian tidak dipengaruhi perbandingan semen portland – pasir dan dikendalikan oleh difusi uap air.

Model matematis yang diajukan dapat digunakan untuk mendekati peristiwa dekomposisi mineral *ettringite* dan *portlandite* dalam mortar. Untuk kisaran suhu 200°C – 450°C diperoleh nilai tetapan-tetapan kinetika

$$\ln k_1 = -1337,5/T - 2,0855$$

$$\ln k_2 = -5440,5/T - 8,1432$$

$$\ln D_e = -4605,8/T - 9,522$$

dengan ralat rerata masing-masing 0,58%, 4,96%, dan 5,23%.

Penurunan kekuatan mekanik (kuat desak) mortar akibat pembakaran lebih disebabkan oleh karena adanya dekomposisi mineral *portlandite* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dalam mortar. Hubungan persen penurunan kuat desak mortar terhadap persen pengurangan berat bahan merupakan fungsi suhu dan dapat didekati dengan persamaan,

$$200^\circ\text{C} : f/f_0 = -6,2213(dW/W_0) + 92,004;$$

$$300^\circ\text{C} : f/f_0 = -15,653(dW/W_0) + 121,14;$$

$$400^\circ\text{C} : f/f_0 = -9,3924(dW/W_0) + 87,887;$$

$$450^\circ\text{C} : f/f_0 = -11,732(dW/W_0) + 96,123.$$

DAFTAR DAN ARTI LAMBANG

C_{Ag} : konsentrasi uap air, mol/cm^3

C_{AS} : konsentrasi air kristal, mol/cm^3

C_{Aout} : konsentrasi uap air di udara, mol/cm^3

D_e : difusivitas efektif uap air, cm/menit

f : kuat desak bahan, psi

f_0 : kuat desak awal bahan, psi

k_1 : tetapan reaksi ke kanan dekomposisi mortar, $1/\text{menit}$

k_2 : tetapan reaksi ke kiri dekomposisi mortar, $1/\text{menit}$

k_g : koefisien transfer massa dari permukaan sampel ke udara, $1/\text{menit}$

L : panjang sampel, cm

M_A : berat molekul H_2O

R : jari-jari sampel, cm

r : posisi arah radial, cm

t : waktu, menit

W_A : berat air kristal tiap saat, g

W_{A0} : berat air kristal awal g

W_0 : berat sampel awal, g

X : fraksi pengurangan berat bahan, %

z : posisi arah aksial, cm

UCAPAN TERIMA KASIH

Atas terlaksananya penelitian ini Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Universitas Gadjah Mada atas bantuan Dana DIK-Suplemen-nya dan juga kepada Jurusan Teknik Kimia FT-UGM khususnya segenap staf dan karyawan di Laboratorium Teknologi Keramik FT-UGM atas segala sarana dan prasarana yang telah diberikan selama penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Balazs, G., Boros, M., and Thomas, T., 1997, "Factor Affecting Cement Strength Studied by Model Cement Made of Clinker Minerals", Proceeding of the 10th International Congress on Chemistry of Cement, Plenary Lectures, vol. 1, Clinker and Cement Production, Sweden.
- Castillo, C and Durrani, A.J., 1990, "Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete", *ACI Material Journal*, 1, 47-53.
- Duda, W.H., 1985, "Cement Data Book", International Process Engineering in the Cement Industry, 2ed, Completely Revised and Enlarged New Edition, Bauverlag GmbH-Wiesbaden.
- Federal Highway Administration, 2001, "Portland Cement", United State Department of Transportation, Washington.
- Global Cement Information System, 2001, "Cement Standards", Global Network of Construction.
- G.M. Indorn Consult, 2000, "Deterioration", G.M. Indorn Consult: World Leader in Concrete Technology, Ramboll.
- Jonatka, I, 2000, "Hydration of The Cement Paste with Na_2CO_3 Addition", *Ceramic-Silikaty*, 45 (1), 16-23.
- Mara, J.C., Cozzi, A.D., Pareizs, J.M., Jurgensen, A.R., Missimer, D.M., and Congdon, J.W., 2000, "Phase Development and Sintering Studies on an Immobilized Pu Ceramic Form", United State Department of Energy, Washington.
- Perdana, I., 2001, "Pengaruh Dehidrasi terhadap Kekuatan Mekanik Semen Terhidrat", Laporan Penelitian DPP, FT-UGM, Yogyakarta.
- Popovics, S., 2002, "Concrete Material", Standard Publisher Distributors, Nai Sarak, India.
- Sumardi, P., 1999, "Perlakuan Panas Terhadap Semen Terhidrasi", Laboratorium Teknologi Keramik, Jurusan Teknik Kimia, FT-UGM, Yogyakarta.
- Taylor, H.F.W., 1964, "The Chemistry of Cements", vol. 2, Academic Press, London.